

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360195

研究課題名(和文)大規模断層を対象とした強震動予測手法確立と各種構造物の損傷メカニズムの解明

研究課題名(英文)Development of Strong Motion Prediction Model for Huge Subduction Fault and Damage-Mechanism Analysis of Various Types of Structures

研究代表者

杉戸 真太(sugito, masata)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：60115863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円、(間接経費) 3,660,000円

研究成果の概要(和文)：(1)各種構造形式の非線形応答解析に基づく損傷メカニズムの解明：様々な特徴を有する入力地震動による各種構造形式の応答解析結果を分析し、特にRC構造については長い強震継続時間を有する地震動による損傷メカニズムに関する定量的な評価指標について提案した。

(2)海溝型巨大地震を対象とした広域地震被害想定：継続時間が3～5分にも及ぶ南海トラフ巨大地震による精度の高い被害推定を岐阜県域を対象として実施した。

(3)地域固有の深い基盤構造による長周期地震動を考慮した予測手法の開発：長周期地震動を含む強震動予測法を開発し、濃尾平野並びに大阪平野を対象として強震動を算出し、長大橋梁などの耐震化検討実務に活用した。

研究成果の概要(英文)：(1) Clarification of Damage Mechanism based on the non-linear response analysis of various types of structures : Detailed analyses were done including the response analysis of various types of civil engineering structures. The quantitative assessments were carried out for the typical RC structures for strong motion with long ground motion duration.

(2) Assessment of strong motion damage distribution for wide areas against the huge earthquakes at subduction zone : The strong motion with long duration of 3 to 4 minutes were simulated for the Nankai-Trough Earthquake. They were applied to the damage assessment for Gifu prefecture and many cities in Tokai district.

(3) Earthquake motion prediction including long period components generated by the sub-surface local soil structures : The prediction model including the effect of sub-surface deep soil structures was developed, and applied to the Nobi and Osaka Plains.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震工学 強震動 海溝型巨大地震 構造物損傷度 耐震設計 震動継続時間

1. 研究開始当初の背景

近年のめざましい経済発展を遂げた我が国は、先の兵庫県南部地震で断層近傍において強烈な強震動を生じさせる内陸直下地震による震災を経験した。この震災を受けて、様々な社会基盤施設の耐震基準が見直され、強大な地震荷重に対しても崩壊を免れるレベルの設計思想が一般化した。

一方、南海トラフ沿いで繰り返し発生してきている海溝型巨大地震については、過去60年間経験していない。地震規模は小さいが断層近傍で強大な地震動となる内陸直下地震に対して、近年被災経験のない断層規模のきわめて大きな海溝型巨大地震に対する地震防災を実行するにあたり、考慮しなければならない点は、第一に「地震動が非常に長い強震継続時間となること」であり、第二に「被害が著しく広域に及ぶこと」の2つと考えられる。

現在、逼迫性が極めて高いとされる東海、東南海、南海地震等を対象とした地震防災事業が様々な形で実施されているが、とくに第一の点による被害の拡大について具体的な検討を早急に実施し、その結果を防災実務に反映させることがきわめて重要なことである。

2. 研究の目的

近い将来必ず来襲する海溝型巨大地震による地震動の工学的特徴を適確に予測する手法を開発し、地震動の最大強さに加えて強震継続時間が非常に長いことによる構造物の損傷度、被災度を、構造種別毎に定量的に算定できる方法論を提案することが本研究の目的である。

ケーススタディとして海溝型巨大地震である東海、東南海地震を対象とし、構造形式としては、一般的な木造構造、道路、鉄道等の高架部分に使われるRCラーメン構造、鋼構造、さらに、継続時間の影響が著しい液状化地盤における土構造物を取りあげ、地震動強度、継続時間と被害程度との関係について詳細に検討する。

3. 研究の方法

申請者らにより開発された強震動予測法(EMPR)を地域固有の長周期地震動をも含む予測法(EMPR-HB)に拡張するとともに、各種構造系の損傷メカニズムに対する強震継続時間の影響を精査し、その成果の広域被害想定や地震危険度評価への適用法を提案する。年次計画を以下に示す。

- (1) 海溝型巨大地震による長い強震継続時間を有する地震動推定法の開発(H.23年度)
- (2) 構造系の損傷度からみた強震継続時間の定義に関する検討(H.23年度)

- (3) 各種構造形式の非線形時刻歴応答解析に基づく損傷メカニズムの解明(H.23~24年度)
- (4) 海溝型巨大地震を対象とした広域地震被害想定(H.24~25年度)
- (5) 地域地震危険度評価への適用手法の提案(H.25年度)

各年度の研究計画は以下のとおりである。

[平成23年度]

- (1) 海溝型巨大地震による長い強震継続時間を有する地震動推定法の開発

申請者らにより開発された工学的基盤における非定常地震動の予測手法(EMPR)¹⁾は、過去の多くの強震記録をベースにした強震動予測法であるが、巨大地震による強震記録はほとんど得られていないために、巨大地震特有の地域固有の長周期地震動を適確に取り入れた予測法の開発が望まれていた。本研究では、最近のK-Net観測網記録を詳細に検討し、このような長周期地震動を含む予測手法(EMPR-HR)に拡張する。これまでも、愛知県南部地域での長大橋梁のための設計用地震動作成の実績²⁾があり、各地域に適用できる予測法として提案する。

- (2) 構造系の損傷度からみた強震継続時間の定義に関する検討

上記(1)の検討結果を踏まえ、各種構造形式毎に異なる強震継続時間の影響を明確にし、強震動の破壊力をその“強度”と“継続時間”の二つにより表現することを提案する。ここでは、自治体の地震被害想定で重要な検討事項となる(a)一般の木造家屋構造、多くの土木構造物の構造形式である(b)RC構造、(c)鋼構造、さらに、継続時間の影響が著しいと考えられる(d)液状化地盤における土木構造物、等を対象として、それぞれの構造形式の被害レベルを二つの地震動情報から推定する手法を検討する。

[平成24年度]

- (3) 各種構造形式の非線形時刻歴応答解析に基づく損傷メカニズムの解明

前年度に実施される(2)の解析・検討をさらに発展させ、長い強震継続時間を有する地震動による各種構造形式の損傷メカニズムに関して詳細な検討を実施する。たとえば、分担者北原³⁾による鋼製橋脚の耐荷性能の実験結果(図-4)にみられるように、非線形領域に達してもいわゆる“ねばり強さ”のある鋼構造系はあるレベルの剛性とエネルギー吸収能を保有し、極端な破壊形態には簡単には至らないことがわかる。図-4(a)は、入力地震動の加速度波形で50秒前後に最大加速度となっており、その時点で図-4(b)に示されるように鋼製橋脚の水平変位が大きくなるが、その後もそのレベルでの変位応答を保っている。

これは、いったん液状化が発生した地盤上の堤防のような盛り土構造がその後の地震動入力により極端に沈下・崩壊に至る現象とは大きく異なっている。このような構造形式に大きく依存する損傷メカニズムについて、詳細な入力特性と損傷レベルとの関係の定式化を試みる。

(4) 海溝型巨大地震を対象とした地震被害想定

各自治体ではその地域で発生するであろう地震を想定し、それによる広域地震被害推定を行い、地震防災事業を実施している。海溝型巨大地震の影響が大きい地域では、本研究での検討結果が有効に活用されるものと考えられる。

たとえば、(a)通常の計測震度のみから建物被害を推定した場合と、(b)本研究で提案される強震継続時間の影響を考慮した等価震度に基づく場合とでは、(b)の方が全体として被害の程度が高くなるとともに、とくに継続時間が相対的に長くなる地域においてその推定被害の増分が大きくなることを定量的に示すことができる。この場合の継続時間は、断層の大きさのみならず、断層破壊方向と対象地域との相対的な位置関係にも大きく依存することが予想される。

[平成25年度]

(5) 地域地震危険度評価への適用手法の提案

近年その手法が確立されつつある地域地震危険度解析の結果に上記検討結果を組み入れる方法論について検討する。地震危険度解析では、年超過確率に対応する地震動強度レベルが算定されるが、その地震動強度に対応する地震像、すなわち、そのような地震動強度をその地域に与える地震の規模(M)と断層までの距離(R)が同時に得られる。したがって、このMとRより、(1)、(2)で定義される強震動継続時間を算定することにより、これまで“地震動強度”のみを対象としてきた地震危険度解析に“継続時間”の情報も組み入れることができ、とくに海溝型巨大地震の影響の大きい地域における地震危険度解析をより有効なものとすることができる。

4. 研究成果

本研究実施により以下に研究成果が得られた。

(1) 各種構造形式の非線形時刻歴応答解析に基づく損傷メカニズムの解明：前年度までに実施された解析・検討結果を総合的に検討した。とくに、RC構造を対象として、長い強震継続時間を有する地震動による損傷メカニズムに関する定量的な評価指標について検討した。この結果に基づき、自治体の地震被害想定調査等に活用できるような簡易被害関数として提案した。

(2) 海溝型巨大地震を対象とした広域地震被害想定：平成24年度に、我が国での最大規模の海溝型地震である南海トラフ巨大地震の断層モデルが

内閣府から発表された。各自治体では、この想定地震による広域地震被害推定を行い、地震防災事業を実施している。強震継続時間が3~5分にも及ぶこの地震による被害推定において本研究での検討結果を有効に活用し、精度の高い地震被害想定を岐阜県などを対象として試みた。

(3) 地域固有の深い基盤構造による長周期地震動を考慮した強震動予測手法の提案：地震規模が大きい場合には、濃尾平野、大阪平野などの深い基盤構造を有する地域において、固有の長周期地震動が卓越する。この地域を対象として、南海トラフ巨大地震による長周期地震動を含む強震動予測法を開発した。この手法によるシミュレーション地震動を長大橋梁などの耐震化検討実務において活用した。

研究分担者による本研究課題に直接関わる研究成果ならびに関連して関わる研究成果について、以下に示す。

[1] 応答包絡線の閾値超過時間を用いた地震動継続時間のスペクトル表現とその応用

岐阜大学工学部 能島暢呂

強震動の継続時間は、振幅特性、周波数特性とともに、揺れを特徴づける経時特性の一つである¹⁾。その評価方法としては、加速度パワーの累積曲線における主要部(例えば5~95%)に相当する時間²⁾や、所定の閾値を最初に超過してから最後に下回るまでの時間(例えば1cm/s 継続時間マップ³⁾)が挙げられる。しかし、時間間隔の長いサブイベントや余震の影響で継続時間が過大評価される可能性があることや、周期特性を考慮できないなど、目的によってはこれらの定義には難点がある。石井⁴⁾は線形一自由度系の応答波形を用いて継続時間スペクトルを定義して周期特性を考慮したが、累積パワー規準を採用している。本研究は応答包絡線⁵⁾に閾値を設定した継続時間スペクトルを定義し、地震防災・地震工学面での応用を検討した。[文献番号に対応する論文は、学会発表リストの4)に示されるものである。]

[2] 地域固有の長周期地震動特性の推定と地震動算定法の検討

岐阜大学流域圏科学研究センター 久世益充

海溝型巨大地震は強震継続時間が長く、短周期~長周期の地震動レベルが卓越する。そのため、長大橋や高層ビルなどの固有周期の長い建造物の耐震性検討においては、地震動の長周期成分を十分に考慮することが重要である。一方、周期数秒レベルの長周期地震動は、着目地域の深部地盤構造の影響により卓越する場合がある。そこで、過去の強震記録に基づいて開発された地震動予測手法EMPRを用いて、着目地域固有の長周期地震動特

性を推定する手法を開発すると共に、これに基づいた地震動算定法について検討した。

[3] 大規模断層に起因する強震動が長周期構造物に与える影響

立命館大学理工学部 伊津野和行

2011年東北地方太平洋沖地震では各種構造物に大きな被害が生じたが、地震動継続時間の長さから、改めて地震動の長周期成分の影響が着目された。ここで、電力設備の中の送電用鉄塔に着目すると、送電用鉄塔における今回の地震時の被害として、がいし装置等の付属機器の破損や盛土崩壊に伴う鉄塔傾斜、津波による鉄塔の流出の被害が生じたが、地震動そのものによる鉄塔の倒壊や傾斜の被害は報告されていない。しかし、鉄塔本体に対して電線は径間長によっては固有周期が数秒程度となるケースもあり、また、減衰も小さいことから、電線の振動が大きく成長することで電線同士の接触なども懸念される。電線同士の接触は短絡事故となり、停電が生じる原因となることから、地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響を解明しておくことは重要であると考えられる。そこで、鉄塔と電線を連成させた解析モデルによる地震応答解析に基づき、地震動の継続時間が鉄塔本体と電線の応答へ及ぼす影響について検討した。

[4] 強震継続時間の長い地震動に対する有効応力解析の適用性

徳島大学 リソカワインズ研究部 渦岡良介

強震継続時間が長い地震動が作用した場合の河川堤防や道路盛土などの土構造物を対象として地盤の液状化を考慮した地震応答解析（有効応力解析）を行い、複数の解析手法の適用性を検討するとともに、有効応力解析で用いる土の構成モデルの具備すべき条件について検討した。

解析対象は、1978年宮城県沖地震、2003年宮城県北部地震、2011年東北地方太平洋沖地震の影響を受けた宮城県鳴瀬川左岸の浜市堤防（河口から1.55km）である。1978年宮城県沖地震において50cm程度の天端沈下量、縦断クラックが生じる被害を受けた。その後の2003年、2011年の地震では大きな被害を受けていない。ここでは近傍での地震動波形が観測されている2003年および2011年地震について、複数の有効応力解析手法による再現解析を実施し、二つの地震に対する河川堤防の地震時挙動を検討した。

[5] 数十回オーダー繰り返し繰り返し荷を受ける既設鋼製橋脚の耐力低下に関する基礎的研究

関東学院大学 理工学部 北原武嗣

近年、構造物の地震応答に関して、海溝型巨大地震により励起される長周期かつ長継続時間の地震動の与える影響が注目されている。本研究では、海溝型巨大地震のような数百秒に及ぶ継続時間の長い地震動を受ける既設高架橋の耐震性能を把握することを目的として、都市高架橋に多用されている単柱式鋼製橋脚を検討対象とし、数十回オーダーの繰り返し振幅が構造物の耐荷性能に与える影響について解析的検討を行った。対象となる鋼製橋脚に関しては、幅厚比パラメータを変化させた解析モデルを用い、各モデルに対して漸増載荷によって局部座屈の発生を確認した後、弾性範囲の繰返し変位を与えて局部座屈への影響について検討を行った。

[6] 地震動の継続時間がRC橋脚の耐震挙動に及ぼす影響

名古屋工業大学工学系研究科 岩本政巳

本研究課題の目的は、近い将来来襲すると予測されている海溝型巨大地震による地震動の工学的特徴を適確に予測する手法を開発し、地震動の最大強さに加えて強震継続時間が非常に長いことによる構造物の損傷度、被災度を、構造種別毎に定量的に算定できる方法論を提案することである。

その一環として分担者は、試設計したRC橋脚を対象に地震応答解析を行い、計測震度や継続時間といった地震動の特性と構造物の損傷程度との関係について検討した。また、繰り返し繰り返し荷による耐力（剛性）低下が地震時挙動に及ぼす影響、本震に続いて余震が復旧前の構造物に作用した場合の損傷の程度について調べた。

[7] 地盤の不整形性を考慮した震度ハザードマップへのアプローチ

長野工業高等専門学校 古本吉倫

一般に、地震動予測は震源から地表への地震の伝播メカニズムを想定して算出されるが、表層地盤はボーリング調査（点測定）に基づき数100m四方の独立した成層地盤メッシュとして扱われる。このため、基盤が傾斜して地盤構造に急激な変動がある（=不整形地盤）地域において予想される波動の反射・屈折は考慮されていない。不整形地盤では、地震波が複雑に反射・屈折を繰り返すため、理想的な成層地盤の場合と比べ、地震動増幅特性が複雑になってしまう。すなわち、従来の地震動予測は隣接メッシュ間で起こると考えられるエネルギー収支の相互作用が考慮されておらず、不整形地盤の予測には精度的に問題がある。本研究はこの問題点を解決し、精度の高い地震動予測図を作成した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

- 1) 久世益充・杉戸真太, 地域固有の長周期地震動特性を考慮した地震動算定法の検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol.69, No4 地震工学論文集第 32 巻, pp.1_291-1_297, 2013. [査読有]
- 2) 佐藤雄亮・伊津野和行: 地震動の継続時間が送電用鉄塔の応答に及ぼす影響に関する検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. 1_396-1_404, 2013. [査読有]
- 3) Uzuoka, R., Shimabukuro, J. and Kuse, M.: Effect of input motion characteristics on seismic deformation of a river levee, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, 393-397, 2013. [査読無]
- 4) 田中賢太郎, 北原武嗣, 松村政秀, 頭井洋: エネルギー吸収型桁間衝突防止装置を用いた橋梁下部構造への地震力低減効果に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol.68, No.4(地震工学論文集, Vol.31-b), pp. _704-712, 2012. [査読有]
- 5) 岩本政巳, 正木智弘, 杉戸真太: 地震動の継続時間が RC 橋脚の耐震挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 2014 (投稿中)
- 6) Furumoto, Y., Miyazawa, A. and Sugito, M.: Site Amplification Evaluation in the Case of Non-horizontal and Nonlinear Stratification, The 15th World Conference on Earthquake Engineering (Paper ID : 2063), 2012.9, Lisboa, Portugal. [査読無]

[学会発表](計8件)

- 1) 久世益充・杉戸真太・奥村正樹: 濃尾平野固有の長周期地震動特性推定に関する一考察, 土木学会中部支部研究発表会, 2014.3.7 岐阜大学
- 2) 久世益充・杉戸真太・奥村正樹: 大阪湾周辺における周期数秒レベルの地震動特性評価と地震動予測, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10~9.12 発表予定 大阪大学
- 3) 久世益充・鶴飼昌寛・杉戸真太: 強震継続時間の影響を考慮した建物被害予測の一考察, 地域安全学会第 32 回研究発表会, 2013.5.18 雄山閣 (秋田県男鹿市)
- 4) 能島暢呂・杉戸真太・久世益充: 応答包絡線の閾値超過時間を用いた地震動継続時間のスペクトル表現とその応用, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 2013.9.4 日本大学
- 5) 坪井仙一, 大隅俊陽, 渦岡良介, 仙頭紀明: 強震継続時間の長い地震動に対する有効応力解析の適用性, 第 1 回地盤工学から見た堤防

技術シンポジウム, 2013.11.25 東京

- 6) 濱野剛, 鈴木拓馬, 北原武嗣, 岸祐介, 山口隆司: 継続時間の長い地震動による繰返し変位が鋼製橋脚の耐力低下に与える影響, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 2013.9.4 日本大学
- 7) 古本吉倫・桑原優: 地盤の不整形性を考慮した震度ハザードマップへのアプローチ, 地盤工学会中部支部第 25 回中部地盤工学シンポジウム, 2013.8.9 名古屋大学
- 8) 宮澤明子, 古本吉倫: 地盤の不整形性を考慮した震度ハザードマップについて, 平成 23 年度 土木学会中部支部研究発表会, 2012.3.8 信州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉戸 真太 (SUGITO MASATA)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授
研究者番号: 60115863

(2) 研究分担者

能島 暢呂 (NOJIMA NOBUOTO)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号: 20222200

久世 益充 (KUSE MASUMITSU)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・助教
研究者番号: 30397319

伊津野 和行 (IZUNO KAZUYUKI)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 90168328

渦岡 良介 (UZUOKA RYOUSUKE)
徳島大学・リサーチエンジニアリング研究部・教授
研究者番号: 40333306

北原 武嗣 (KITAHARA TAKETSUGU)
関東学院大学・理工学科・教授
研究者番号: 00331992

岩本 政巳 (IWAMOTO MASAMI)
名古屋工業大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 60232716

古本 吉倫 (FURUMOTO YOSHINORI)
長野高等・環境都市工学科・准教授
研究者番号: 90303510